# 节水灌溉农业的空间认知与建议*



吴炳方[1]　闫娜娜[1]　曾红伟[1]　蒋礼平[2]　朱伟伟[1]

1 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室　北京　100101

2 世界银行北京代表处　北京　100004

**摘要**　水资源危机已经严重阻碍了社会经济的发展。作为耗水大户的农业，现在以及未来很长时间都将面临“以较少的水资源消耗生产更多粮食”的艰巨任务。自1980年以来，我国节水灌溉农业发展迅速，农业节水灌溉措施的实施极大地减少了农业灌溉取用水量，显著提高了灌溉效率，然而水资源危机并没有得到缓解，流域地下水水位持续下降的趋势并未得到遏制，这一现状使人们不得不重新审视节水农业存在的问题。文章从水资源消耗的视角，充分利用遥感技术在作物分布、蒸散发、产量空间格局和时间动态变化监测的优势，在区域尺度上认识节水灌溉农业发展中存在的问题和面临的挑战，提出利益相关者参与式的“耗水管理”是节水高效农业发展以及成功实施的必然途径。

**关键词**　耗水管理，高效节水农业，水分生产率，节水潜力

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2017.01.009

## 1 引言

中国淡水资源总量丰富，达 28 000 亿 $m^3$，但人均只有 2 200 $m^3$，仅为世界平均水平的1/4，是全球人均水资源最为贫乏的13个国家之一。我国水资源空间分布不均，北方的水资源只有南方的1/4，资源性缺水以及不当的水资源开发利用方式，引发了一系列社会、经济以及生态环境问题。北方地区尤为严重，地下水超采、河流断流、入海流量锐减，有些地区如华北地区出现地面沉降、海水入侵、河流纳污能力减弱、水污染问题进一步恶化等一系列灾害和生态环境问题，都严重地阻碍着社会经济的可持续发展。

2011年中央一号文件明确提出，实行最严格的水资源管理制度，建立用水总量控制、用水效率控制和水功能区限制纳污“三项制度”，即水资源管理“三条红线”，力图缓解

*资助项目：中科院知识创新工程重大项目（KZCX1-YW-08-03），全球环境基金（GEF）海河流域水资源与水环境综合管理项目（TF053183）

修改稿收到日期：2016年9月10日

水资源过度利用与水污染产生的问题。随着经济社会的快速发展，工业、生活以及生态等行业用水需求将持续增加，水资源在行业间的竞争将减少分配给农业的水资源量。针对严峻的水资源现状，为了有效缓解水资源紧张状况，促进流域水资源可持续利用，作为耗水大户的农业一直是节水的重点，期望以较少的水资源消耗生产更多的粮食，担负着保障国家粮食安全的重任。

我国节水灌溉农业发展至今，取得显著成效的同时，也存在很多的问题[1]。然而现有的管理方法和技术手段都不能很好地回答或者解决目前水资源危机带来的问题，亟需新的手段和技术方法的创新。在中科院知识创新工程重大项目"海河流域治理工程生态环境效应遥感监测与评估"课题和世界银行环球基金"海河流域水资源与水环境综合管理"项目支持下，经过近 10 年对海河流域水资源问题的研究提出了"耗水管理"理念[2,3]。耗水管理是对"供水管理"和"需水管理"的补充和完善，着眼于控制水资源的消耗量（ET），强调目标ET控制，通过减少耗水，提高水分生产率，实现水资源的可持续与高效利用。本文以海河流域为北方水资源问题的典型代表区，基于耗水管理理念，从耗水的视角来审视节水农业发展中存在的问题，重新认识流域节水所面临的问题和艰巨的挑战，针对节水灌溉农业发展提出对策及建议。

## 2 节水灌溉农业发展现状

早在 20 世纪 60 年代，我国就开始进行了节水灌溉技术的研究和推广。20 世纪 90 年代，随着干旱缺水问题的日趋严重，我国节水农业开始出现了加速发展的局面。目前，节水农业的发展，已从小面积试点，转向较大面积的集中连片；从田间节水，开始转向全面节水。近 10 年来节水农业发展劲头十足。

节水灌溉发展的资金投入来源包括国家和地方政府财政、银行信贷、自筹资金以及国外资金等，其中，国家财政投入主要负责水源和干支渠渠道等骨干工程，信贷和自筹资金主要是由地方和农户投入用于末端节水灌溉工程。根据《全国水利发展统计公报》数据，2004 年、2008 年水利建设投资总额分别 783.5 亿元和 1 088.2 亿元，其中用于灌溉的财政投入为 87.6 亿元和 116.6 亿元。2014 年全国水利建设投资总额高达 4 083.1 亿元，灌区建设与改造 114 亿元，小型农田水利建设 378 亿元。2000 年以来，我国在灌溉农业发展的投入呈持续增长的态势，节水农业的发展得到了国家的高度关注。

我国有灌溉条件的农田约占耕地总面积的 47%[1]。当前农业灌溉面积比建国初期增加了近 3 倍，引水输水以及井灌区建设和改造等节水灌溉工程大大减少了农业灌溉中的输水损失。截至 2010 年，节水灌溉工程面积达 4 亿亩，渠道防渗控制灌溉面积占总节水灌溉面积的 42%，低压管道输水灌溉占 25%，喷灌约占 11%，微灌约占 8%，其他占 14%[4]。以海河流域为例，自 1980 年以来农田灌溉面积迅速增长，目前总有效灌溉面积约为 1 亿亩，占耕地总面积的 60%[5]。截至 2010 年，海河流域节水灌溉面积约有 6 000 万亩，超过 4 050 万亩耕地（灌溉面积的 37.2%）使用了渠道衬砌和管道配水技术，而 738 万亩耕地（灌溉面积的 7%）使用了滴灌和喷灌技术，主要应用于果园和大棚[6]。

我国农业用水量占总用水量的比重从 1980 的 88%，1993 年的 66% 降至 2009 年的 62%，单位面积用水量从494 立方米/亩回落到 459 立方米/亩[1,4]。2000 年以来全国农业用水量基本平稳，2014 年农业用水量（约 3 870 亿 $m^3$）占总量的 63.5%。海河流域的农业用水量趋势与我国情况基本一致，自 1980 年以来农业用水在波动中呈逐步下降的趋势，农业用水高峰年出现在 1989 年，达到 335 亿 $m^3$。但 2000 年以后，农业用水量一直保持在 300 亿 $m^3$ 以下[7]。据《海河流域水资源公报》，2000 年和 2014 年全流域总用水量分别为 398 亿 $m^3$ 和 370 亿 $m^3$，其中农业用水量分别为 281 亿 $m^3$ 和 233 亿 $m^3$，占总用水量的 70% 和 63%。

节水灌溉发展使得我国灌溉水利用系数从 20 世纪 80 年代不足 0.3 提高到 2000 年的 0.44，2010 年进一步提高到 0.50[1,8]。2011 年中央一号文件提出到 2020 年灌溉水利用系数提高到 0.55。由于节水灌溉工程建设，如渠道衬砌、低压管道等建设减少了从水源到农田输水损失量，因此灌溉效率明显提高。2010 年华北地区的灌溉水利用系数平均为 0.6，变化范围在 0.5—0.9 之间，为我国灌溉水利用系数最高的区域。该区域经济发达，水资源问题最为严重，国家和地方政府在该区域的节水灌溉资金投入相对较高。

## 3 节水灌溉农业发展的认识与思考

国家在节水灌溉农业方向投入了大量资金，在减少用水量和提高灌溉效率方面的确取得了显著的成效，但是同时也要正确看待由此导致的问题。

### 3.1 地下水超采问题没有得到减缓，反而愈演愈烈

地下水是我国重要的灌溉水源，全国农业灌溉地下水开采量 666 亿 $m^3$，占全国农田灌溉总用水量的19%；在地下水实际开采量中，用于农田灌溉的地下水开采量占 54.3 %。但由于水资源地区分配不均，地下水开采利用程度呈现明显的地区差异，最为严重的地区为华北地区。华北地区耕地面积约5.5亿亩，约占全国总耕地的 28%[9,10]，地下水供农业用水占38%，其中河北省占 75%，山西和河南占 50% 以上。

当聚焦到地下水开采地区，不难发现这样一个现象：节水农业快速发展的几十年历程里，尽管政府投入大量资金进行灌溉工程措施的建设，如渠道衬砌、防渗加固、低压管道以及先进的喷滴灌技术手段，但是地下水超采问题依旧，并没有因为这些灌溉工程的建设得到减缓。以节水灌溉投资力度最大的河北省为例，井灌面积超过了总灌溉面积的 60%，节水灌溉面积超过40%，然而唐山、石家庄、保定、廊坊等城市浅层地下水水位每年以 1—2 m 的速度下降，深层水漏斗面积达 2.44 万 $km^2$ [5]。由于地下水不易更新，其过度开采使得水资源危机愈发严重，同时引发一系列的生态环境问题。

“地下水持续超采问题依旧”“节约的农业用水量究竟去哪了”等成为了管理部门与科研工作者最为困扰的一些问题。在华北平原地区实施的渠道衬砌、防渗加固、低压管道以及喷滴灌等手段减少了灌溉水的渗漏，提高了灌溉效率，但也减少了对地下水的补给[11]，原因是大多数节水措施实施前“损失的水资源”在流域尺度上并没有从水系统中损失掉，如下渗到地下补充地下水的水量可以被再次取用，灌溉回流到河流的水量在下游也可以被再利用。因此，节水灌溉工程只是提高灌溉效率、提高田间的灌溉保证率，对修复地下水过度超采的状况却于事无补，减少的取水量不等于节水量。如果将灌溉工程减少的渗漏损失或减少的用水量，当成节省的水量并用于扩大灌溉面积，反而会恶化地下水的超采问题，造成“越节水、越超采”的恶性循环。

更需注意的是，在地下水超采问题突出的区域，以“节约用水量”以及“提高灌溉水分利用系数”为目标的节水农业发展不能改善地下水超采现象。

### 3.2 节水对区域水分生产率提高的贡献率

水分生产率指的是消耗单位水资源量所获得的产量（单位：$kg/m^3$），是高效节水农业发展评价的重要指标。利用区域蒸散遥感模型 ETWatch 生产的月尺度蒸散（ET）遥感数据、基于遥感数据驱动的 CASA 作物模型估算的生物量数据及收获指数，结合冬小麦作物分布，得到了2003—2009 年海河流域平原区冬小麦的多年平均水分生产率为 1.049 $kg/m^3$，变化范围为 0.1—1.6 $kg/m^3$ [12]。冬小麦水分生产率的空间分布差异显著，水分生产率高值区集中在海河流域的洪泛区和黄河灌区，该区域对应较低的耗水量和较高干物质量累积量。海河流域的东部地区水分生产率较低，对应较高的耗水量和中等偏上水平的干物质累积量。实验站作物ET与产量分析研究结果表明，当 ET 达到 460—463 mm 之前，产量与 ET 呈线性增长的趋势，之后产量变化趋于稳定[13,14]。现状像元尺度冬小麦 ET 低于 460 mm 的临界值，产量与 ET 的关系

统仍然处于线性关系，说明区域水分生产率仍然有提高的空间。

从同一地点不同时期的ET、产量与水分生产率的趋势变化可以分析水分生产率提高的原因。表 1 是基于1984—2002 年 8 个农业气象站的冬小麦产量数据和遥感反演的 ET 数据，采用线性趋势分析方法建立的 ET、产量和水分生产率间的关系。所有站点的冬小麦产量自1984 年以来呈显著增加的趋势，变化范围为 100.4— 211.4 kg/hm$^2$，产量线性回归方程的决定系数 $R^2$ 为 0.60—0.97，所有站点均通过了 95% 的置信度检验。ET 在1984—2002 年间总体呈增加的趋势，但增加幅度低于产量的增加幅度，斜率变化范围为 0.09—4.49，所有站点的线性回归分析均没有通过显著性检验。水分生产率总体呈增加的趋势，有 4 个站点线性回归方程通过了 95% 置信度检验，水分生产率的变化趋势存在明显的空间差异。以海河流域封丘县为例，粮食（冬小麦）水分利用效率在 1949—1996 年间从 0.23 kg/m$^3$ 增加到 0.90 kg/m$^3$，粮食产量自 20 世纪 50 年代以来增加了 5.98 倍，而耗水仅增加了 28.3%[15]。上述分析说明了20年来产量的增加主要是由于灌溉保证率提高后，使得农民有意愿投入，采用改良品种，增加氮肥和磷肥以及农药的用量，加强田间管理，从而提高了单产水平，但水量消耗的增加有限，原来的无效耗水转变成了有效耗水。

综上所述，从空间和时间尺度的分析结果表明冬小麦单产的显著增加是近20 年来流域平原区冬小麦水分生产率显著提高的根本原因。

### 3.3 高估了农业节水的潜力

基于用水量的节水潜力估算是目前水管理部门中应用最广的一种方法。“在大田漫灌式的灌水方式下，我国的一些农田每亩地需用 800 m$^3$的水，而按照节水农业的用水标准，只需要 200 m$^3$。目前，如果全国灌溉用水的平均利用率提高 10%，每年即可节约 400 亿 m$^3$水用于农业，相当于全国每年农业用水量的 10%，可以大大缓解我国农业的干旱缺水矛盾”[16]。将这个方法应用到海河流域，2000 年农业用水量为 281 亿 m$^3$，灌溉用水利用率从 2000 年 0.44 提高到2010 年 0.6，提高了约 36%，意味着节约了101 亿 m$^3$ 的用水量。正如前面提到的减少的取水量不等于节水量，这种计算方法会严重误导节水农业的发展，并引发更严重的水资源短缺。

基于耗水量的节水潜力评估方法得出不同的结果[17]（表 2）。选择海河流域及周边农气条件相近的实验区，通过对覆盖/覆膜措施、调亏灌溉和种植结构调整单项措施以及综合措施实验数据的汇总分析，发现节水不减产的措施主要以覆盖/覆膜措施和综合措施（覆盖+调亏灌溉）为主。对于覆盖/覆膜措施来讲，冬小麦秸秆覆盖减少约 3% 水分消耗，增产约 18%；对于玉米，

表 1 农气站点 ET、产量和水分生产率趋势变化信息

| 站点 | 产量线性回归方程 | ET线性回归方程 | 水分生产率线性回归方程 |
|---|---|---|---|
| 宝坻 | $y$=158.2$x$+2910（$R^2$=0.60）* | $y$=1.65$x$+210（$R^2$=0.11） | $y$=0.06$x$+1.39（$R^2$=0.53）* |
| 涿州 | $y$=211.4$x$+1915（$R^2$=0.97）* | $y$=1.32$x$+205（$R^2$=0.12） | $y$=0.09$x$+0.98（$R^2$=0.89）* |
| 栾城 | $y$=155.1$x$+4421（$R^2$=0.88）* | $y$=2.93$x$+275（$R^2$=0.13） | $y$=0.04$x$+1.61（$R^2$=0.44） |
| 肥乡 | $y$=141.8$x$+3016（$R^2$=0.83）* | $y$=4.49$x$+239（$R^2$=0.24） | $y$=0.03$x$+1.31（$R^2$=0.31） |
| 馆陶 | $y$=112.2$x$+3374（$R^2$=0.77）* | $y$=3.12$x$+238（$R^2$=0.24） | $y$=0.02$x$+1.44（$R^2$=0.23） |
| 成安 | $y$=114.8$x$+3695（$R^2$=0.81）* | $y$=0.09$x$+115（$R^2$=0.00） | $y$=0.05$x$+1.30（$R^2$=0.48）* |
| 安阳 | $y$=100.4$x$+3085（$R^2$=0.89）* | $y$=4.4$x$+265（$R^2$=0.26） | $y$=0.02$x$+1.18（$R^2$=0.16） |
| 新乡 | $y$=184.5$x$+2322（$R^2$=0.90）* | $y$=1.98$x$+230（$R^2$=0.11） | $y$=0.06$x$+1.05（$R^2$=0.64）* |

*表示通过95%的置信度检验

减少约 4% 水分消耗，同时增产约 5%；棉花塑料薄膜覆盖的效果为节约 11%水分消耗，增产约 23%。对于综合措施来讲，小麦节省 9%的水分消耗且增产 19%，玉米节省 6% 的水分消耗同时增产 13%。利用流域 2010 年作物分布数据统计得到海河流域的冬小麦面积 367 万 $hm^2$，玉米 522 万 $hm^2$，棉花 73万 $hm^2$[2]，根据节水措施节水效果，覆盖/覆膜技术每年节水可达 16 亿 $m^3$，综合节水措施每年节水量只有 26 亿 $m^3$，显著低于前面提到的节约 101 亿 $m^3$的取用水量。假设维持产量不变，通过休耕、轮作等方式额外节水，得到冬小麦、玉米和棉花 3 种主要作物总的节水潜力为 41 亿 $m^3$[17]。

利用耗水平衡分析方法[2]，在保证生态流量的前提下，2003—2009 年海河流域地下水超采量为 62.5 亿 $m^3$，目前农艺节水措施可达到的节水量只有地下水超采量的 2/3，剩下的 21.5 亿 $m^3$ 的缺口只能通过增加休耕规模或调亏灌溉来实现，而这两种方法都会导致粮食产量的减少。通过分析调亏灌溉和种植结构调整的 6 种方案情景，结果表明减少 21.5 亿 $m^3$ 的耗水量相应的会有 400 万—780 万 t 粮食产量的减产[17]。如果冬小麦种植面积减少 114.36 万 $hm^2$，约占目前冬小麦种植面积的 31%，其产量减少约 400 万 t，或者对 118.95 万 $hm^2$ 的冬小麦夏玉米套种区域采用高度缺水的调亏灌溉方式，将造成产量损失 490 万 t，这两种方案都能减少 21.5 亿 $m^3$ 的耗水量。

综上所述，基于用水量的节水量估算结果远大于基于耗水量的节水量估算结果。在现有种植结构下，前者估算得到的节水潜力是后者的 2 倍多。基于耗水量减少的节水潜力反应了一个事实“作物存在即产生消耗”。在地下水源为主的农业灌溉区域，作物耗水量减少直接的效果就是地下水开采量减少。

## 4 高效节水农业发展对策和建议

高效节水农业的发展是缓解用水矛盾、实现水资源可持续利用的一个重要手段，同时也是传统农业向现代农业转化的一个重要标志。但从前一节的分析可知，节水灌溉农业发展需要新的理念和技术手段，“耗水管理”理念以及一系列的技术方法对于重新认识节水误区以及节水发展方向提供了支撑。然而在分析中也发现政府和农民利益相关者的参与也不可小觑。因此，利益相关者特别是农民参与的“耗水管理”是节水农业发展措施得以实施的重要保障。

从耗水管理理念出发，通过重新认识节水灌溉农业发展中的“地下水超采”“提高水分生产率”以及“农业节水潜力”，建立利益相关者参与式的“耗水管理”是节水高效农业发展以及成功实施的必然途径。

（1）明确流域的最大农业耗水量。灌溉水利用效

表 2　覆盖和综合节水措施节水潜力[17]

| 措施 | 作物类型 | 面积（ha） | 影响（%） | | 现状ET | | 现状单产（$tha^{-1}$） | 现状产量（Mt） | $\Delta$ET（$10^9$ $m^3$） | $\Delta$产量（$10^6$ t） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ET | 产量 | mm | $10^9 m^3$ | | | | |
| 秸秆覆盖 | 冬小麦 | 3 670 000 | -3 | 18 | 333 | 12.2 | 3.5 | 12.8 | 0.4 | 2.3 |
| | 玉米 | 5 220 000 | -4 | 5 | 319 | 16.6 | 5.5 | 28.6 | 0.7 | 1.4 |
| 覆膜 | 棉花 | 730 000 | -11 | 23 | 585 | 4.3 | 1.9 | 1.4 | 0.5 | 0.3 |
| 小计 | | | | | | 33.1 | | | 1.6 | |
| 综合措施 | 冬小麦 | 3 670 000 | -9 | 19 | 333 | 12.2 | 3.5 | 12.8 | 1.1 | 2.4 |
| | 玉米 | 5 220 000 | -6 | 13 | 319 | 16.6 | 5.5 | 28.6 | 1.0 | 3.7 |
| | 棉花 | 730 000 | -11 | 23 | 585 | 4.3 | 1.9 | 1.4 | 0.5 | 0.3 |
| 小计 | | | | | | | | | 2.6 | |

率的提高减少了取水量，提高了灌溉保证率，但不一定减少了耗水量。如果将减少的取水量当作节省的水量投入使用，特别是用于扩大灌溉面积，将使得耗水量增加，地下水超采问题愈演愈烈。通过现象看本质，充分认识到“作物即耗水”，只有“耗水量的减少”才能从根本上解决流域水资源问题。对于一个流域来讲，水资源量是有限的，也是有数的，多年平均降雨量减去生态环境耗水量和河流的生态流量，是人类活动可以消耗的最大可耗水量，再减去工业和生活的耗水量，就是农业的可耗水量。只有每个集水区、子流域、流域都明确了最大农业耗水规模，“作物/农田总耗水量的限制”才能从根本上解决水资源问题，也是避免地下水超采的良策。

（2）提高基于耗水量的区域水分生产率是高效节水农业发展的目标。20 世纪 80 年代以来节水农业措施的实施，尽管用水取水量大幅减小，灌溉效率显著提高，但是对于作物耗水量的减少效果有限，而水分生产率得到显著改善的根本原因是产量的提高，因此厘清节水减耗和产量增加对提高区域水分生产率的贡献度很重要。“以不牺牲粮食为代价的耗水量减少” 的农艺节水措施可作为区域节水推广的手段，提高单产、提高单位面积产出的效益是提高水分生产率的关键，如通过种植结构的调整生产高品质、高价值的农产品。

（3） 农业的节水潜力对于区域农业发展规划与水资源配置极其重要。作为耗水大户的农业，在很长一段时间都会是节水的重中之重。当前以用水量减少为核心的节水潜力评估严重高估了节水农业的潜力，基于该节水量进行的水资源分配和农业规划势必导致水资源问题越来越严重。以减少耗水量为核心的节水潜力评估结果表明，在水资源问题突出地区，不影响粮食生产的情况下农业节水潜力的空间很有限，充分认识到节水潜力的合理估算对于如何在粮食安全与节水之间找到平衡点至关重要。

（4） 高效节水农业发展需要政府管理和农民参与的有机结合。从政府层面来讲，需要制定合理的政策框架，明确水资源利用边界（水权），限制无节制的、无补偿的水资源侵蚀行为，农民才会积极主动地去寻求“低投入高产出”的措施；通过发挥基于社区的农民用水协会的作用，通过道德、信任、透明、可核查及水权交易方式推动农民的积极参与，重塑农民用水的社区管理方式，才是减少耗水的根本。同时加大对农民的教育投资，使其了解水资源危机的危害，意识到自己的利益与节水密切相关。

## 5 结语

当前日益严重的缺水形势下，节水高效农业是我国现代化农业发展的一个主要内容，也是解决我国水资源危机特别是北方地区水资源危机的重要环节，更是水资源可持续利用以及国家社会经济可持续发展的重大举措。农业用水管理从“以需定供”时代发展到当前的“以供定需”，仍然不能很好的解决目前水资源危机的问题，亟需通过技术创新，带动发展理念和体制机制的创新，从而走出一条全新的节水高效农业发展之路。蒸散遥感技术的创新发展已能定量、精确地刻画农业的耗水量，从而为基于“耗水量”的农业总耗水量控制、提高农业生产效率等方面提供创新技术保证，利益相关者参与式的“耗水管理”是节水高效农业发展以及成功的必然途径。

### 参考文献


1 山仑. 能否实现大量节约灌溉用水？我国节水农业现状与展望. 自然, 2006, 28(2): 71-74.

2 Wu B, Jiang L, Yan N, et al. Basin-wide evapotranspiration management: Concept and practical application in Hai Basin, China. Agricultural Water Management, 2014, 145: 145-153.

3 任宪韶, 吴炳方. 流域耗水管理方法与实践. 北京: 科学出版社, 2014.

4 孙伟. 中国农业节水技术推广关键影响因素研究. 东北农业大

学, 2012.
5 郭宏宇, 曹寅白. 海河流域50年治理成就和展望. 水利水电工程设计, 2000, 19(2):1-4.
6 朱晓春, 王白陆, 王韶华, 等. 海河流域节水和高效用水战略. 天津: 水利部海河水利委员会, 2009.
7 Jia S F, Ge Z, Fang X. Less water, more grain in dry Hebei Province, China. Water International, 2011, 36(7): 861-872.
8 郭珺, 龙海游, 郭振苗. 对今后我国节水灌溉发展对策的思考. 节水灌溉, 2009, 2: 47-48.
9 于静洁, 任鸿遵. 华北地区粮食生产与水供应情势分析. 自然资源学报, 2001, 16(4): 360-365.
10 杜森. 华北地区节水农业发展现状及对策. 中国农技推广, 2013, 6: 43-44.
11 Kendy E, Zhang Y, Liu C, et al. Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: case study of Luancheng County, Hebei Province, 1949–2000. Hydrol. Process, 2004, 18: 2289-2302.
12 Yan N N, Wu B F. Integrated Spatial-Temporal Analysis of Crop Water Productivity of Winter Wheat in Hai Basin. Agricultural Water Management, 2014, 133: 24-33.
13 Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. Agric. Water Management, 2002, 55(3): 203-216.
14 Li H J, Zheng L, Lei Y P. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. Agricultural Water Management, 2008, 95: 1271-1278.
15 徐富安, 赵炳梓. 封丘地区粮食生产水分利用效率历史演变及其潜力分析. 土壤学报, 2001, 38(4): 491-497.
16 姜长云. 中国节水农业: 现状与发展方向. 农业经济问题, 2001, 10: 19-23.
17 Yan N N, Wu B F, Perry C, et al. Assessing potential water savings in agriculture on the Hai Basin plain, China. Agricultural Water Man agement, 2015, 154: 11-19.

# Outlook on Water Saving Agriculture

Wu Bingfang[1]  Yan Nana[1]  Zeng Hongwei[1]  Jiang Liping[2]  Zhu Weiwei[1]

（1 Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2 Beijing Representative Office of World Bank, Beijing 100004, China）

**Abstract** Water resources crisis is a critical issue that had seriously hampered the development of social economy. As a major water consumption user, the development of agriculture will face the challenge of "less water consumption and more food production". Since 1980s, agriculture experienced the rapid development period of water conservation irrigation in China. The implementation of water conservation measures greatly reduced the irrigation water retrieval amount, and improved the irrigation efficiency. The crisis, however, has not been eased, and the ground water table is continually decreasing. We have to re-examine and review the water conservation agriculture schemes. Taking the advantage of remote sensing on dynamically monitoring crop evapotranspiration, crop pattern, and crop yield in temporal-spatial scales, this study aims to explore the existed problems and challenges in the development of water conservation irrigation agriculture from the new perspective of water consumption, and proposes that the water consumption management with stakeholders participation would be an inevitable way for the sustainable development of water resources.

**Keywords** water consumption management, water conservation agriculture, water productivity, water saving potential

**吴炳方** 中科院遥感与数字地球所研究员，博士生导师，数字地球科学重点实验室/数字农业研究室主任，研究领域包括农业遥感、水资源遥感与管理、生态遥感研究。E-mail: wubf@radi.ac.cn

**Wu Bingfang** Received Ph.D. degree from Tsinghua University in 1989, is Full Professor at Key Laboratory of Digital Earth Science, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research interests include agriculture remote sensing, water resource and management, and ecology remote sensing. E-mail: wubf@radi.ac.cn